影响“亚洲水塔”的水汽输送过程

周天军[1,3,4*]　高　晶[2,3]　赵　寅[1,4]　张丽霞[1,3]　张文霞[1]

1 中国科学院大气物理研究所 北京 100029
2 中国科学院青藏高原研究所 北京 100101
3 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心 北京 100101
4 中国科学院大学 地球与行星科学学院 北京 100049

摘要　青藏高原及其周边区域被誉为“亚洲水塔”，过去50年的全球变暖加速了整个“亚洲水塔”的水循环过程。文章从气候态、长期变化和年际变率的角度，总结了当前对影响“亚洲水塔”的关键水汽输送过程及其机理的理解。在此基础上，指出要厘清影响“亚洲水塔”的水循环过程，亟待深入理解水塔的水汽输送过程的时空变化特征和机制及其影响。为此，需要从观测、诊断、动力学机理、检测归因和数值模拟5个方面加强未来的研究工作。

关键词　亚洲水塔，水汽输送，季风，西风，观测，数值模拟

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.004

1 “亚洲水塔”水汽输送研究的意义

青藏高原具有南极、北极之外最大的储冰量[1]，是亚洲12条重要河流的发源地，包括印度河、恒河、雅鲁藏布江、长江、黄河等，为超过20亿人口提供了必需的水资源[2]。大量水资源以冰川、积雪、湖泊和河流等形式储存在“亚洲水塔”，复杂的大气-陆地-海洋相互作用维持了该地区活跃的水循环过程[3,4]。热力和大地形动力的作用，使得青藏高原不断从印度洋和西太平洋地区抽吸水汽，水汽输送到高原后，以降水的形式进入高原水循环，成为补给高原水资源的关键机制之一。水汽输送决定了“亚洲水塔”水资源的基本分布特征和变化趋势。

青藏高原是气候变化的响应敏感区，自20世纪50年代以来，伴随全球增暖，青藏高原温度显著升高，导致冰川退化和冻土消融等，与水汽输送过程相关的旱涝事件频发[5-7]。研究水汽输送过程是理解青藏高原及其周边地区作为“亚洲水塔”的特征及其变化原因的重要环节。

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20060102），第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0208）
修改稿收到日期：2019年10月14日

2 影响“亚洲水塔”的水汽输送气候特征

在气候平均态下，“亚洲水塔”的降水集中在夏季，其水汽输送的主导大气环流系统为南亚季风（又称“印度季风”）和西风。基于多套再分析数据的分析表明，夏季的青藏高原是一个水汽汇，就青藏高原整体而言其净水汽辐合率为 4 mm day^{-1}，水汽输送以南边界为主，主要来源于印度洋和孟加拉湾；其次是西边界的输送，其输送的水汽量约为南边界的 32%[8]。

影响青藏高原不同区域的水汽输送过程不同。基于欧拉水汽追踪模型的分析表明，若以 32°N 为界将青藏高原分为南部、北部 2 个区域，就气候平均而言：高原北部为低层西风控制区，西北地区（从高原主体延伸到欧洲）为该地区降水提供了约 38.9% 的水汽来源；而高原东南部主要受亚洲季风控制，高原东南部至印度洋地区为高原南部降水提供了约 51.4% 的水汽来源[9]。基于拉格朗日水汽追踪模型的分析表明，高原水汽主要来源于赤道西印度洋至阿拉伯海的细长输送带和孟加拉湾；此外，还包括源自高原西北侧欧亚大陆的水汽，其中阿拉伯海的水汽输送占主导地位，且受南亚夏季风调控[10]。

关于水汽输送的估算受资料和方法的影响，二者的不确定性都会影响到估算结果的不确定性。近年来国际上开始通过在大气环流模式中加入水汽示踪物来追踪水汽的来源。基于 CAM5.1（The Community Atmosphere Model version 5.1）的模拟研究表明：① 在气候态下，夏季来自热带印度洋的水汽输送控制高原南部的降水，其贡献约为 28.5% 左右。② 对于高原北部的降水而言，夏季以高原自身水汽的贡献为主，约为 25.8%；冬季来自非洲的水汽输送为主导，约为 19%[11]。

水汽输送的实现与水汽通道密切相关。位于青藏高原东南部的雅鲁藏布大峡谷下段近于南北走向，在地形上构成一条巨大的通道。夏季来自印度洋和孟加拉湾的偏南暖湿水汽输送，自孟加拉湾出海口沿布拉马普特拉河上溯至大峡谷，形成著名的雅鲁藏布江水汽通道，使得雅鲁藏布江下游年平均降水量可达 600—800 mm。基于多套再分析资料的研究表明，夏季该水汽通道的整层水汽输送约为 143.0 kg m^{-1} s^{-1}，水汽收支诊断表明，夏季流域平均的水汽辐合约 9.5 mm day^{-1}，主要来自风场辐合与地形坡度的贡献[12]。

水汽的辐合和抬升是影响水汽输送的重要过程。基于再分析资料的诊断发现，暖湿空气在高原南缘辐合上升，在到达高原主体高度后辐散，辐散气流加强了高原表面的热低压引起的辐合气流，进一步维持高原上空的对流系统，最终形成高原云和降水[13]。观测中，印度次大陆中东部和青藏高原西南部的降水变化高度相关，原因是在印度中东部发展起来的对流系统在对流层中层（500 hPa）西南风的引导下越过喜马拉雅山，将携带的水汽输送到高原西南部，这一水汽输送机制被称作“抬升-翻越”机制（up-and-over）（图 1）[14,15]。当大气低层（850 hPa）有闭合低压中心、中层（850—300 hPa）有越过喜马拉雅山的西南气流、高层（300 hPa）伊朗高压和南亚高压之间为偏南风时，则有利于将印度上空的对流系统及水汽输送到高原内部。基于数值模拟试验比较“抬升-翻越”机制、地形爬升机制和局地蒸发对高原西南部降水的贡献，

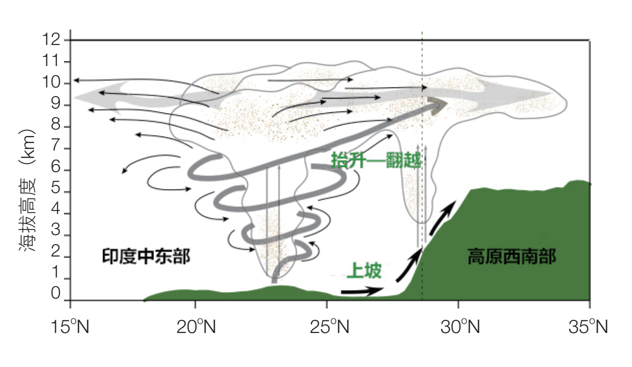


图 1 “抬升 - 翻越”机制示意图 [14]
虚线表示青藏高原西南部边界，即海拔 2 500 m

结果表明高原西南部降水 98% 的水汽来自外部输送，其中“抬升-翻越”机制的贡献为 56%—82%[14]。

气候模式是揭示“亚洲水塔”水汽输送特征的重要工具。目前全球环流模式多高估青藏高原降水，原因和模拟的水汽输送偏多有关，其中地形拖曳作用和喜马拉雅山脉南麓的地形对流降水在此过程中作用显著。动力降尺度实验表明，地形精度是影响模式对青藏高原水汽输送模拟能力的重要因子，高分辨率模式更加准确地刻画了喜马拉雅山脉的复杂地形，能更好地模拟出地形拖曳作用、减弱南风，从而减少来自高原南边界的水汽输送；分辨率为 2 km 的模拟实验可以模拟出喜马拉雅山脉南麓的地形对流降水，使喜马拉雅南侧降水增加而高原内部降水减少[16]。此外，在模式中加入次网格地形拖曳作用的参数化方案也可提高模式对高原降水的模拟能力[17]。基于对流可分辨模式的敏感性实验结果表明，喜马拉雅山中段北坡降水偏少的“干带”的形成，主要是由于南坡对流降水消耗大气水汽引起的[18]。

3 影响“亚洲水塔”的水汽输送长期变化

气候变暖引起青藏高原冰川、冻土、雪盖等发生变化，造成高原冰冻圈水循环加剧[19]。此外，水汽输送的变化亦对“亚洲水塔”的水循环具有重要影响。观测表明，1979—2010 年，青藏高原上的冰川和降水呈现空间不均匀的变化趋势：由于印度季风减弱和降水减少，高原东南部的冰川消融明显；而由于西风加强和降水的增加，高原西北部的冰川有所增长[1]。

从更长时间的变化趋势来看，均一化后的 CN05.1 格点资料和高原地区 79 个站点观测资料显示，1951—2015 年青藏高原中部和北部的年平均降水呈现显著增加趋势，以三江源地区最为明显，强度中心增速超过 0.06 mm d^{-1} 10 a^{-1}，此外高原西北帕米尔地区降水亦显著增加（约 0.02 mm d^{-1} 10 a^{-1}），而青藏高原东部和东南侧降水显著减小（图 2a 和 b）。观测站点在高原的分布极为不均匀，东部地区站点分布较为密集，格点数据的结果较为可靠，而西部地区站点分布稀少，格点资料揭示的降水增加趋势可信度较低。整体而言，青藏高原降水趋势空间分布不均匀。自 1960 年以来，CN05.1 格点资料表明青藏高原区域平均降水尽管呈增加趋势，但在统计上并不显著，且 2012—2015 年，高原地区平均降水突然减少（图 2c）。考虑到高原西部站点资料稀疏，资料格点化过程可能会导

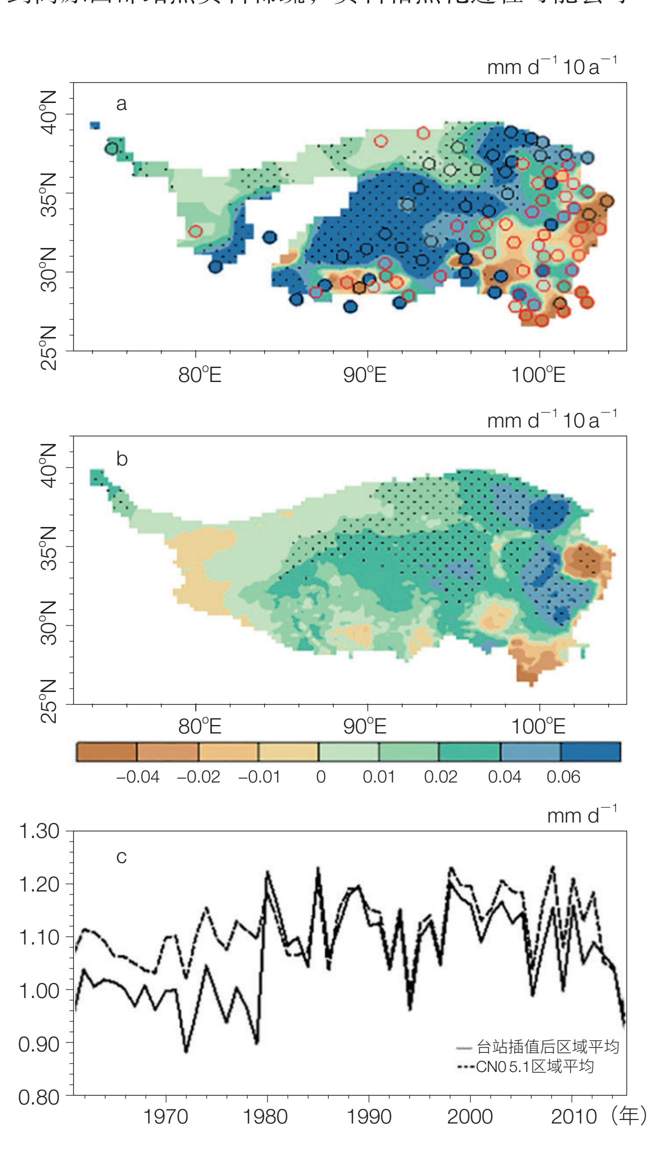


图 2　1951—2015 年年平均降水线性趋势的水平分布（a 和 b）以及年平均降水序列（c）

（a）为高原地区 79 个站点降水资料结果；（b）为 CN05.1 格点资料结果；阴影为将 79 个站点降水插值到 0.5。的格点资料结果，圈点表示站点观测，打点区域表示格点资料通过 95% 置信水平的地区，黑色圈点表示通过 95% 置信水平，红色圈点表示未通过 95% 置信水平

致虚假的增加高原西部降水出现虚假的趋势，因此本研究进一步分析了79个站点格点化的降水，结果发现高原地区区域平均的降水增加趋势 1960—2013 年较之 CN05.1 更强，且同样显示出 2012 年之后的变干特征（图 2c）。总之，由于缺少足够的台站观测资料支撑，目前青藏高原降水的变化趋势估算结果还存在较大的不确定性，研究时段和站点的选择不同，使得高原降水量的变化趋势估算结果存在明显差异，表明内部变率对高原降水变化具有重要作用。

格点化的观测资料显示，1979—2013 年青藏高原中西部（约为 85°E—95°E，30°N—37°N）的降水在增加；针对这一目标区，基于欧拉水汽追踪模型的分析表明，气候态下目标区超过 69%（21%）的水汽来源于陆地（海洋），主要由来自西部的西风急流和来自西南部的印度夏季风引导，局地水汽对降水的贡献约为 18%。从年循环的角度来看，每年 5—6 月西风输送主导目标区的水汽供给，7—8 月印度夏季风和东亚夏季风的贡献变得显著，并在 9 月成为主导水汽来源。在降水增加的 1979—2013 年，增加的水汽主要源于西南部水汽输送和局地水汽供给的加强；同时，目标区的降水再循环率显著增加，这表明该区域的水循环正在加强[20]。与高原北部的降水增多不同，高原南部的降水呈减少趋势。利用欧拉水汽追踪模型，从水汽来源的角度比较 1979—2016 年青藏高原北部（35°N 以北）和南部（30°N 以南）降水水汽来源的不同，结果表明，来自亚洲季风区和高原主体的水汽输送对高原北部降水增加的贡献分别为 35.8% 和 51.7%；而对于高原南部的降水减少现象，水汽追踪结果表明这是因为来自欧亚大陆（位于高原西北方向）的水汽输送对高原南部降水的贡献减少。就来自印度次大陆的水汽来说，其对高原北部降水的贡献增加，对高原南部降水的贡献减少[9]。

另有研究以降水和蒸发之差为指标，基于再分析数据，从水汽收支的角度分析了 1979—2011 年青藏高原主体变湿和高原东南部（雅鲁藏布江大峡谷附近）变干的原因，强调垂直速度和水平环流（动力项）变化的作用。具体来说，高原主体的增湿现象主要缘于急流的北移和南亚夏季风的加强，季风环流携带大量水汽向北进入高原，从而引起高原上空的水汽输送净通量呈增加趋势，同时热成风引起高空辐散和异常上升运动，最终引起高原主体降水的增加；虽然输送至高原的水汽有所增加，但该工作表明动力项（大气环流的变化）的影响比热力项（水汽的变化）更加显著；而对于雅鲁藏布江大峡谷的变干趋势，分析表明其主要缘于高层辐合低层辐散所对应的异常下沉运动[21]。

基于中国气象局 88 个台站均一化的逐日观测降水资料的研究表明，自 1979 年以来，青藏高原东南部降水在 5 月份呈显著增加趋势，降水频率和强度的增加共同导致了总降水量的增加（13.46%/10 a）。基于 ERA-Interim 再分析资料的水汽收支和环流诊断表明，由于 20 世纪 90 年代末太平洋年代际振荡（Interdecadal Pacific Oscillation，IPO）由正位相转为负位相，每年 5 月亚洲大陆和印度洋间的经向海陆热力梯度自 1979 年以来增加，南亚夏季风爆发提前，来自北印度洋的异常西南风增强了向高原东南部的水汽输送，进而造成近 40 年来高原东南部每年 5 月降水显著增加（图 3）[22]。

4 影响“亚洲水塔”的水汽输送年际和年代际变化

青藏高原东部降水的年际变化主要呈现为南北偶极子型，在高原降水偏多的年份，西边界和南边界的水汽输送均有增加，南亚季风偏强，主要体现为孟加拉湾和印度北部的反气旋异常和印度南部的气旋异常。虽然气候态下通过南边界的水汽输送对青藏高原夏季降水的贡献最大，但在年际尺度上，西边界水汽输送的变化更为显著[8]。因此，比较来自不同边界的

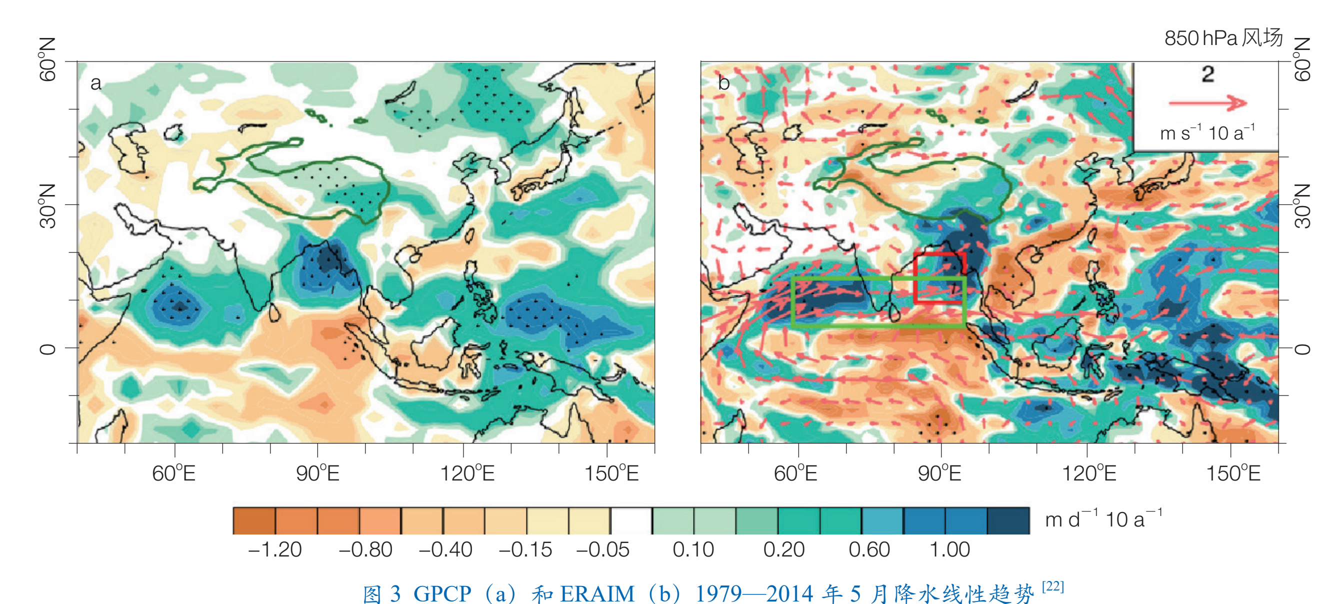


图 3 GPCP（a）和 ERAIM（b）1979—2014 年 5 月降水线性趋势[22]

箭头表示 850 hPa 风场线性趋势；打点区域表示降水趋势通过 5% 显著性水平检验

水汽输送的影响，需要关注大尺度环流背景。

西边界水汽输送对青藏高原东部降水年际变率的影响是通过夏季北大西洋涛动（NAO）和中纬度波列实现的。具体来说，NAO 正位相时，500 hPa 上高原近地面有反气旋异常，减弱了高原西部的水汽输入；欧洲西北部上空 200 hPa 有高压异常，作为波源向下游的高原输送波列，在高原东南部上空激发异常气旋，减弱高原南部上空的垂直运动和降水；此外，NAO 正位相年高原上空急流北移，使得输送到高原的水汽减少，高原降水减少[23]。印度半岛中部和西北部的降水和高原东南部降水呈反相变化，赤道印度洋东南部海温异常是这一偶极子变化型的驱动因子。该区域海温异常令局地对流加强，通过加强局地 Hadley 环流抑制了印度半岛中部和西北部以及孟加拉湾北部降水。降水负异常进一步激发局地异常反气旋，向高原东南部输送更多的水汽，最终造成异常降水[24]。

基于水汽示踪物的大气环流模式模拟结果表明，青藏高原南部夏季降水的年际异常主要源于来自赤道印度洋的水汽输送的变化[11]。具体到高原东南部的雅鲁藏布江流域，在年际尺度上，印度夏季风活动异常通过印度季风区北部的异常气旋或反气旋式环流来影响水汽输送。基于多套再分析资料的诊断表明，纬向和经向辐合对流域总水汽辐合的异常分别贡献了 16.5% 和 83.5%[12]。

在年代际尺度上，青藏高原上空可降水量的变化和大西洋西北部异常海温所激发的中纬度大气异常波列有关。基于再分析数据，研究发现 1979—2014 年，以 1994 年为界，前期青藏高原上空可降水量偏少，而后期可降水量偏多。分析表明，当大西洋西北部海温异常偏低时，将在贝加尔湖上空激发异常气旋。该异常气旋西南侧的偏东气流使通过东边界流出高原的水汽增加，并最终导致青藏高原上空可降水量偏少[25]。

5 降水稳定同位素揭示的水汽传输变化

青藏高原降水氢氧稳定同位素（$\delta^{18}O$ 和 δD）是水汽输送与水汽来源变化的有效指示剂。水中的氢氧稳定同位素在水相态变化时会发生相应的分馏，从而产生特定的同位素组成特征。青藏高原的降水稳定同位素研究工作已经开展 20 余载[26]。已开展的站点降水稳定同位素观测和稳定同位素大气环流模型模拟研究，

使我们清楚地认识到青藏高原降水稳定同位素的变化主要受西风和印度季风环流的水汽输送控制[27-29]，其揭示的水汽输送时空变化特征和变化机制可总结为以下3点认识。

（1）青藏高原降水稳定同位素的“三模态”揭示出西风和印度季风控制的水汽输送的时空差异。研究表明整个青藏高原降水稳定同位素的时空变化呈3种模态（图4），即西风模态、印度季风模态和过渡模态[29]。西风模态表现为降水 $\delta^{18}O$ 与气温和降水量具有相同的季节变化模式，即夏季高值，冬季低值；降水 $\delta^{18}O$ 与气温正相关，西风为终年主导环流。印度季风模态表现为降水 $\delta^{18}O$ 在春季达到最高值，自每年5月开始迅速减小，8月达到最低值，对应于多数站点降水量在夏季达到峰值，在事件和月尺度上，降水 $\delta^{18}O$ 与降水量反相关。这种模态冬季受西风控制，夏季受印度季风控制。过渡模态表现为降水 $\delta^{18}O$ 没有明显的冬季或者夏季的极值，其与气温和降水量的关系也较其他两个区域复杂。不同模态的分界线大致在30°N和35°N。换言之，利用降水 $\delta^{18}O$ 的季节变化特征，我们可以判断出西风和印度季风的水汽输送影响时间和空间范围。

（2）印度季风水汽传输上游的印度北部区域对流活动对青藏高原南部降水具有重要影响。利用青藏高原南部站点观测的季风模态降水 $\delta^{18}O$，结合稳定同位素大气环流模型（LMDZiso）模拟和卫星数据（TES），发现当印度洋水汽传输到印度北部地区时，该地区强烈对流活动贫化低层水汽（可改变降水 $\delta^{18}O$ 值40%—60%），同时加湿低层大气；当水汽传输至喜马拉雅山南坡时，由于强大的地形阻碍，水汽抬升凝结成雨，水汽稳定同位素通过瑞利分馏过程进一步贫化（可使降水 $\delta^{18}O$ 值减小约1%），越湿的大气其水汽贫化程度越强；水汽进入高原内陆以后，受下沉混合作用，水汽稳定同位素略有富集（降水 $\delta^{18}O$ 升高不超过0.5%）[30,31]。

（3）大尺度环流对青藏高原不同区域降水年际变化具有显著影响。在年际尺度中，冰芯 $\delta^{18}O$ 序列变化揭示出ENSO（厄尔尼诺-南方涛动）和IOD（印度洋偶极子）在1976—1977年前后对冰芯季风期 $\delta^{18}O$ 记录

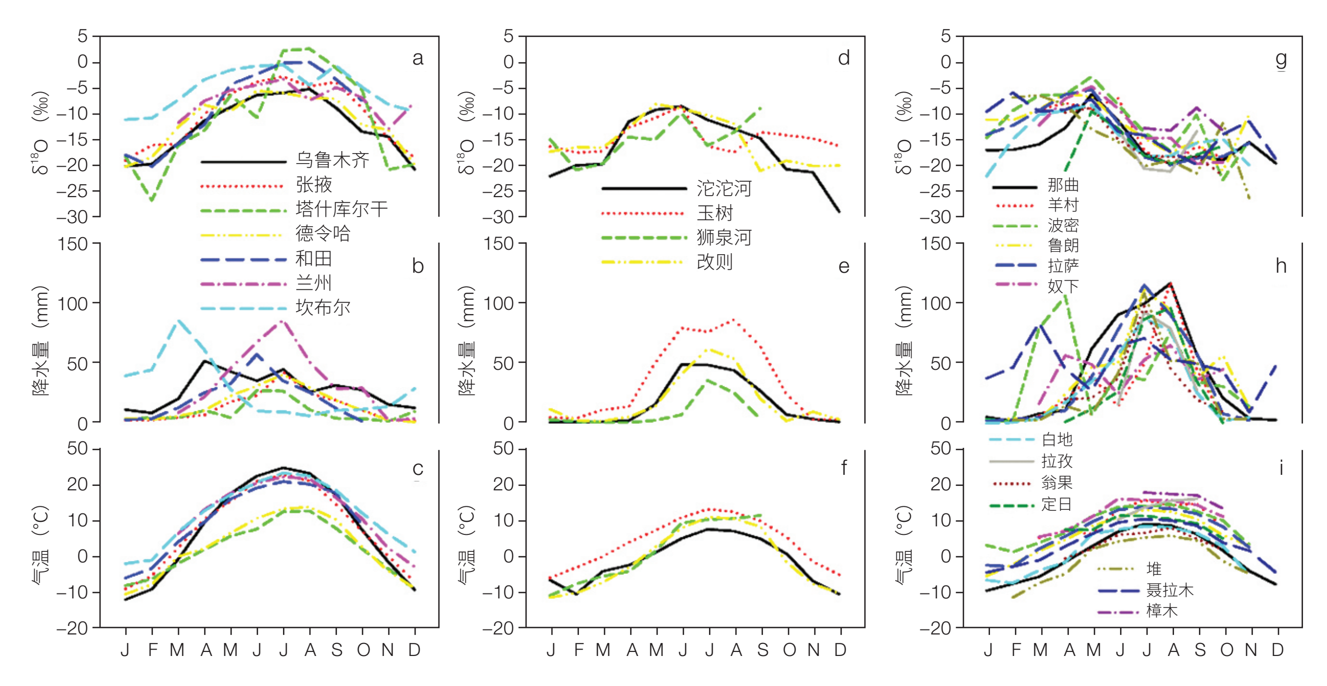


图4　青藏高原降水 $\delta^{18}O$ 季节变化揭示的西风模态（a—c）、印度季风模态（d—f）和过渡模态（g—i）与温度、降水的关系[29]

横坐标为月份，J、F、M、A、M、J、J、A、S、O、N、D依次代表1—12月

有重要影响；而非季风期 $\delta^{18}O$ 记录与中纬度西风活动有着潜在关联[32]。ENSO 通过影响孟加拉湾水域海温和印度季风强度影响了海洋水汽向青藏高原的传输以及降水过程；同时，200 hPa 大气环流通过罗斯贝波将青藏高原与赤道太平洋海域联系起来，通过遥相关影响西风主导下的高原西北部降水[33]。在季节尺度中，季风的爆发和结束会对事件尺度降水 $\delta^{18}O$ 有显著影响。通过在喜马拉雅山南坡加德满都和北坡定日 2 个站点同时监测降水稳定同位素变化，发现在观测季风期（2011—2012 年），印度季风传输水汽开始控制南坡加德满都降水比喜马拉雅山北坡定日早 1 周左右，其在北坡撤退的时间要比其在加德满都早 3 天左右[34]。

6 研究展望

“亚洲水塔”正在经历着加速的水循环过程，理解其变化机理的关键环节是水汽输送。但是，由于“亚洲水塔”水汽输送过程的观测数据较为缺乏，卫星反演数据在高原地区从可靠性、分辨率和观测时长等角度也存在不足，这使得揭示“亚洲水塔”水汽输送的格局和变化规律依然面临很大的挑战。为此，需要加强以下 5 方面工作。

（1）水汽资料的观测。建立涵盖整个“亚洲水塔”地区的高精度水汽输送观测网，包括系统的气象要素和水汽稳定同位素实时观测，并结合新技术和新方法，加强不同高度水汽输送垂直变化过程的观测，并充分提高卫星反演水汽资料的准确度。

（2）关于水汽输送的追踪研究。关于高原陆—气水汽交换与外来水汽量的相对贡献比例有待明晰，亟待通过场地观测、资料诊断、水汽追踪模拟和气候模拟的结合，开展综合分析和研究。要特别注重发挥水汽示踪物在水汽输送研究中的独特作用。

（3）从现代气候动力学的角度明晰西风和印度季风影响“亚洲水塔”水汽收支的机理。关于“亚洲水塔”水汽输送和收支的变率机制，有待从季风、西风变率的角度，有效区分年际变率和年代际变率两种时间尺度，从动力和物理机理上加以认识。

（4）有效区分自然变率和人类活动对“亚洲水塔”的影响。青藏高原在过去 50 多年经历了显著的增暖，伴随这种增暖其水汽含量和输送格局有何变化目前尚不得而知。因此，有待通过观测资料诊断和数值模拟试验相结合，从检测和归因的角度，科学认识人类活动对“亚洲水塔”水汽收支的影响。

（5）改进“亚洲水塔”区域数值模式的性能。数值模拟、观测和理论研究是支撑现代气候学研究的三大手段。受复杂地形的影响，当前的数值模式在“亚洲水塔”区域的性能有待提高，应该结合场地观测试验的开展，完善现有的数值模式，发展对流分辨率的高分辨率模式（CPM），提升气候模式在高原地区的性能；推进适用于“亚洲水塔”的地球系统模式中水汽输送模块的发展，为“亚洲水塔”水循环研究提供关键支撑。

致谢 感谢江洁博士生提供图 2，亦感谢满文敏博士对本文的贡献。

参考文献

1 Yao T, Thompson L G, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.

2 Immerzeel W W, Beek L P H V, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian Water Towers. Science, 2010, 328: 1382-1385.

3 Xu X, Lu C, Shi X, et al. World water tower: an atmospheric perspective. Geophysical Research Letters, 2008, 35(20): 525-530.

4 徐祥德, 赵天良, Lu C, 等. 青藏高原大气水分循环特征. 气象学报, 2014, 72(6): 1079-1095.

5 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估：过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60: 3025-3035.
6 Kuang X, Jiao J J. Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half century. Journal of Geophysical Research, 2016, 121: 3979-4007.
7 Gao J, Yao T D, Masson-Delmotte V, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies. Nature, 2019, 565: 19-21.
8 Feng L, Zhou T J. Water vapor transport for summer precipitation over the Tibetan Plateau: Multidata set analysis. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D20114.
9 Zhang C, Tang Q H, Chen D L, et al. Moisture source changes contributed to different precipitation changes over the northern and southern Tibetan Plateau. Journal of Hydrometeorology, 2019, 20: 217-229.
10 Chen B, Xu X D, Yang S, et al. On the origin and destination of atmospheric moisture and air mass over the Tibetan Plateau. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 110: 423-435.
11 Pan C, Zhu B, Gao J H, et al. Quantitative identification of moisture sources over the Tibetan Plateau and the relationship between thermal forcing and moisture transport. Climate Dynamics, 2019, 52: 181-196.
12 张文霞, 张丽霞, 周天军. 雅鲁藏布江流域夏季降水的年际变化及其原因. 大气科学, 2016, 40(5): 965-980.
13 Xu X, Zhao T L, Lu C, et al. An important mechanism sustaining the atmospheric "water tower" over the Tibetan Plateau. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(20): 11287-11295.
14 Dong W H, Lin Y L, Wright J S, et al. Summer rainfall over the southwestern Tibetan Plateau controlled by deep convection over the Indian subcontinent. Nature Communications, 2016, 7(1): 10925.
15 Dong W, Lin Y, Wright J S, et al. Connections Between a Late Summer Snowstorm Over the Southwestern Tibetan Plateau and a Concurrent Indian Monsoon Low-Pressure System. Journal of Geophysical Research, 2018, 123(24): 11-18.
16 Lin C, Chen D, Yang K, et al. Impact of model resolution on simulating the water vapor transport through the central Himalayas: implication for models' wet bias over the Tibetan Plateau. Climate Dynamics, 2018, 20: 3195-3207.
17 Zhou X, Yang K, Beljaars A, et al. Dynamical impact of parameterized turbulent orographic form drag on the simulation of winter precipitation over the western Tibetan Plateau. Climate Dynamics, 2019, 19: 707-720.
18 Wang Y, Yang K, Zhou X, et al. The Formation of a Dry-Belt in the North Side of Central Himalaya Mountains. Geophysical Research Letters, 2019, 46(5): 2993-3000.
19 Yao T, Xue Y, Chen D, et al. Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444.
20 Zhang C, Tang Q H, Chen D L. Recent changes in the moisture source of precipitation over the Tibetan Plateau. Journal of Climate, 2017, 30: 1807-1819.
21 Gao Y H, Cuo L, Zhang Y. Changes in moisture flux over the Tibetan Plateau during 1979–2011 and possible mechanisms. Journal of Climate, 2014, 27(5): 1876-1893.
22 Zhang W X, Zhou T J, Zhang L X. Wetting and greening Tibetan Plateau in early summer in recent decades. Journal of Geophysical Research, 2017: 122.
23 Wang Z, Duan A, Yang S, et al. Atmospheric moisture budget and its regulation on the variability of summer precipitation over the Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research, 2017, 122: 614-630.
24 Jiang X, Ting M. A Dipole Pattern of Summertime Rainfall across the Indian Subcontinent and the Tibetan Plateau. Journal of Climate, 2017, 30(23): 9607-9620.

25 Zhou C, Zhao P, Chen J, et al. The Interdecadal Change of Summer Water Vapor over the Tibetan Plateau and Associated Mechanisms. Journal of Climate, 2019, 32(13): 4103-4119.

26 姚檀栋, 丁良福, 蒲健辰, 等. 青藏高原唐古拉地区降雪中$\delta^{18}O$特征及其与水汽来源的关系. 科学通报, 1991, 36(20): 1570-1573.

27 康世昌, 秦大河, 任贾文, 等. 青藏高原南部冰芯记录与大气环流的关系. 第四纪研究, 2006, 26(2): 153-164.

28 Tan M. Circulation effect: response of precipitation $\delta^{18}O$ to the ENSO cycle in monsoon regions of China. Climate Dynamics, 2014, 42(3-4): 1067-1077.

29 Yao T D, Masson-Delmottev V, Gao J, et al. A review of climatic controls on $\delta^{18}O$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations. Reviews of Geophysics, 2013, 51(4): 111-119.

30 Gao J, Masson-Delmotte V, Risi C, et al. What controls precipitation delta O-18 in the southern Tibetan Plateau at seasonal and intra-seasonal scales? A case study at Lhasa and Nyalam. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 2013, 65: 14.

31 He Y, Gao J, Yao T, et al. Spatial distribution of stable isotope in precipitation upon the Tibetan Plateau analyzed with various interpolation methods. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(2): 351-359.

32 Zhao H B, Xu B Q, Li Z, et al. Abundant climatic information in water stable isotope record from a maritime glacier on southeastern Tibetan Plateau. Climate Dynamics, 2017, 48: 1161-1171.

33 Yang X X, Yao T D, Zhao D J, et al. Possible ENSO influences on the northwestern Tibetan Plateau revealed from annually resolved ice core records. Journal of Geophysical Research, 2018, 123: 3857-3870.

34 Yu W, Yao T, Tian L, et al., Short-term variability in the dates of the Indian monsoon onset and retreat on the southern and northern slopes of the central Himalayas as determined by precipitation stable isotopes. Climate Dynamics, 2016, 7(1-2): 159-172.

Water Vapor Transport Processes on Asian Water Tower

ZHOU Tianjun[1,3,4*] GAO Jing[2,3] ZHAO Yin[1,4] ZHANG Lixia[1,3] ZHANG Wenxia[1]

(1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;
4 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The Tibetan Plateau is known as the "Asian Water Tower". In the past 50 years, global warming has accelerated the water cycle over the Asian Water Tower. The current understanding on the key processes of water vapor transport over the Asian Water Tower and the behind mechanisms are reviewed in this paper, via the climatology, long-term trend, and interannual variability, respectively. This review further suggests that it is urgent to understand the tempo-spatial changes, mechanisms, and impact of water vapor transport processes over the Asian Water Tower. Therefore, future research should improve capabilities on observation, diagnosis, dynamical mechanism, detection and attribution, as well as numerical simulation.

* Corresponding author

Keywords Asian Water Tower, water vapor transportation, monsoon, westerly, observation, numerical simulation



周天军 中国科学院大气物理研究所研究员，博士生导师，中国科学院大学岗位教授。主要从事气候动力学和气候模拟研究，入选科睿唯安2018年度全球“高被引科学家”。政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次、第六次评估报告（AR5、AR6）的主要作者。世界气候研究计划（WCRP）耦合模拟工作组（WGCM）委员、CLIVAR/GEWEX联合季风委员会委员、牛津气候百科全书顾问委员会委员。英国皇家气象学会期刊*International Journal of Climatology*、*Science Bulletin*、*Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*副主编。E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

ZHOU Tianjun Research Fellow and Doctoral Supervisor of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is interested in climate dynamics and simulation, and was selected as “highly cited scientist” in 2018. Zhou is the main author of the fifth and sixth assessment reports (AR5 and AR6) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). He is a member of the World Climate Research Programme (WCRP) Coupled Modelling Working Group (WGCM), the CLIVAR/GEWEX joint monsoon committee, and the Oxford encyclopedia of climate. He is a deputy editor of *International Journal of Climatology* and *Bulletin of Science*, also an associate editor of *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* and *Journal of Climate*.
E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

参考文献（双语版）

1 Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.

2 Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.

3 Xu X D, Lu C G, Shi X H, et al. World water tower: An atmospheric perspective. Geophysical Research Letters, 2008, 35(20): 525-530.

4 徐祥德, 赵天良, Lu C G, 等. 青藏高原大气水分循环特征. 气象学报, 2014, 72(6): 1079-1095.

Xu X D, Zhao T L, Lu C G, et al. Characteristics of the water cycle in the atmosphere over the Tibetan Plateau. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(6): 1079-1095. (in Chinese)

5 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估：过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60(32): 3025-3035.

Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(32): 3025-3035. (in Chinese)

6 Kuang X X, Jiao J J. Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half century. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(8): 3979-4007.

7 Gao J, Yao T D, Masson-Delmotte V, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies. Nature, 2019, 565(7737): 19-21.

8 Feng L, Zhou T. Water vapor transport for summer precipitation over the Tibetan Plateau: Multidata set analysis. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D20114.

9 Zhang C, Tang Q H, Chen D L, et al. Moisture source changes contributed to different precipitation changes over the northern and southern Tibetan Plateau. Journal of Hydrometeorology, 2019, 20: 217-229.

10 Chen B, Xu X D, Yang S, et al. On the origin and destination of atmospheric moisture and air mass over the Tibetan Plateau. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 110(3): 423-435.

11 Pan C, Zhu B, Gao J H, et al. Quantitative identification of moisture sources over the Tibetan Plateau and the relationship between thermal forcing and moisture transport. Climate Dynamics, 2019, 52(1-2): 181-196.

12 张文霞, 张丽霞, 周天军. 雅鲁藏布江流域夏季降水的年际变化及其原因. 大气科学, 2016, 40(5): 965-980.

Zhang W X, Zhang L X, Zhou T J. Interannual variability and the underlying mechanism of summer precipitation over the Yarlung zangbo river basin. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(5): 965-980. (in Chinese)

13 Xu X, Zhao T, Lu C, et al. An important mechanism sustaining the atmospheric "water tower" over the Tibetan Plateau. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(20): 11287-11295.

14 Dong W H, Lin Y L, Wright J S, et al. Summer rainfall over the southwestern Tibetan Plateau controlled by deep convection over the Indian subcontinent. Nature Communications, 2016, 7: 10925.

15 Dong W, Lin Y, Wright J S, et al. Connections between a late summer snowstorm over the southwestern Tibetan Plateau and a concurrent Indian monsoon low-pressure system. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(24): 13676-13691.

16 Lin C G, Chen D L, Yang K, et al. Impact of model resolution on simulating the water vapor transport through the central Himalayas: Implication for models' wet bias over the Tibetan Plateau. Climate Dynamics, 2018, 51(9-10): 3195-3207.

17 Zhou X, Yang K, Beljaars A, et al. Dynamical impact of parameterized turbulent orographic form drag on the

simulation of winter precipitation over the western Tibetan Plateau. Climate Dynamics, 2019, 53(1-2): 707-720.

18 Wang Y, Yang K, Zhou X, et al. The formation of a dry-belt in the north side of central Himalaya mountains. Geophysical Research Letters, 2019, 46(5): 2993-3000.

19 Yao T, Xue Y, Chen D, et al. Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444.

20 Zhang C, Tang Q H, Chen D L. Recent changes in the moisture source of precipitation over the Tibetan Plateau. Journal of Climate, 2017, 30(5): 1807-1819.

21 Gao Y H, Cuo L, Zhang Y X. Changes in moisture flux over the Tibetan Plateau during 1979—2011 and possible mechanisms. Journal of Climate, 2014, 27(5): 1876-1893.

22 Zhang W X, Zhou T J, Zhang L X. Wetting and greening Tibetan Plateau in early summer in recent decades. Journal of Geophysical Research, 2017: 122.

23 Wang Z Q, Duan A M, Yang S, et al. Atmospheric moisture budget and its regulation on the variability of summer precipitation over the Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(2): 614-630.

24 Jiang X W, Ting M F. A dipole pattern of summertime rainfall across the Indian subcontinent and the Tibetan Plateau. Journal of Climate, 2017, 30(23): 9607-9620.

25 Zhou C Y, Zhao P, Chen J M, et al. The interdecadal change of summer water vapor over the Tibetan Plateau and associated mechanisms. Journal of Climate, 2019, 32(13): 4103-4119.

26 姚檀栋, 丁良福, 蒲建辰, 等. 青藏高原唐古拉山地区降雪中δ18O特征及其与水汽来源的关系. 科学通报, 1991, 36(20): 1570-1573.

Yao T D, Ding L F, Pu J C, et al. Characteristics of δ18O in snowfall in Tanggula area of Qinghai-Tibet Plateau and its relationship with water vapor sources. Chinese Science Bulletin, 1991, 36(20): 1570-1573. (in Chinese)

27 康世昌, 秦大河, 任贾文, 等. 青藏高原南部冰芯记录与大气环流的关系. 第四纪研究, 2006, 26(2): 153-164.

Kang S C, Qin D H, Ren J W, et al. Relationships between an ice core records from southern Tibetan Plateau and atmospheric circulation over Asia. Quaternary Sciences, 2006, 26(2): 153-164. (in Chinese)

28 Tan M. Circulation effect: Response of precipitation δ18O to the ENSO cycle in monsoon regions of China. Climate Dynamics, 2014, 42(3-4): 1067-1077.

29 Yao T D, Masson-Delmottev V, Gao J, et al. A review of climatic controls on δ18O in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations. Reviews of Geophysics, 2013, 51(4): 525-448.

30 Gao J, Masson-Delmotte V, Risi C, et al. What controls precipitation δ18O in the southern Tibetan Plateau at seasonal and intra-seasonal scales? A case study at Lhasa and Nyalam. Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology, 2013, 65(1): 21043.

31 何由, 高晶, 姚檀栋, 等. 利用不同插值方法对青藏高原降水稳定同位素空间分布分析. 冰川冻土, 2015, 37(2): 351-359.

He Y, Gao J, Yao T D, et al. Spatial distribution of stable isotope in precipitation upon the Tibetan Plateau analyzed with various interpolation methods. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(2): 351-359. (in Chinese)

32 Zhao H B, Xu B Q, Li Z, et al. Abundant climatic information in water stable isotope record from a maritime glacier on southeastern Tibetan Plateau. Climate Dynamics, 2017, 48(3-4): 1161-1171.

33 Yang X X, Yao T D, Zhao D J, et al. Possible ENSO influences on the northwestern Tibetan Plateau revealed from annually

resolved ice core records. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(8): 3857-3870.

34 Yu W S, Yao T D, Tian L D, et al. Short-term variability in the dates of the Indian monsoon onset and retreat on the southern and northern slopes of the central Himalayas as determined by precipitation stable isotopes. Climate Dynamics, 2016, 47(1-2): 159-172.